

智能反射表面辅助的无线通信系统的物理层安全综述

卢汉成^{1,2}, 王亚正¹, 赵丹¹, 罗涛¹, 吴俊³

- (1. 中国科学技术大学信息网络实验室, 安徽 合肥 230027;
2. 合肥综合性国家科学中心人工智能研究院, 安徽 合肥 230027;
3. 复旦大学计算机科学与技术学院, 上海 200433)

摘要: 为了满足未来无线通信系统高谱效、高能效的要求, 智能反射表面 (IRS) 技术得到了广泛的关注与研究。通过对 IRS 进行设计优化, 能够从不同的角度增强无线通信系统的物理层安全 (PLS)。基于此, 对现有的 IRS 增强物理层安全的研究进行整理, 从信息理论安全、隐蔽通信、密钥生成等主要方向对现有研究进行了归纳总结, 阐述了各研究热点的模型特点和关键方法。最后, 对 IRS 增强的物理层安全进行了总结梳理, 并探讨了未来的研究热点方向。

关键词: 智能反射表面; 无线通信系统; 物理层安全

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022025

Survey of physical layer security of intelligent reflecting surface-assisted wireless communication systems

LU Hancheng^{1,2}, WANG Yazheng¹, ZHAO Dan¹, LUO Tao¹, WU Jun³

1. Information Network Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China
2. Institute of Artificial Intelligence, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230027, China
3. School of Computer and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: To meet the demand of high spectrum and energy efficiency in future wireless communication systems, intelligent reflecting surface (IRS), a promising technology has attracted significant attention. By proper design of IRS, PLS can be boosted from different perspectives. Based on that, current research about IRS-assisted PLS enhancement from various aspects, e.g., information-theoretic secrecy, covert communication, secret key generation and so on, were summarized. The system features and key solutions of the related papers were reviewed and several future research directions were discussed.

Keywords: intelligent reflecting surface, wireless communication system, physical layer security

0 引言

随着短视频、虚拟现实等业务的兴起, 网络流量的需求飞速增长。未来无线通信系统需要能够同时为大量设备提供服务并且保证一定的谱效和能效。为了实现上述目标, 近年来, 出现了许多先进技术, 如大规模多输入多输出 (MIMO, mul-

ti-ple-input multiple-output)、毫米波 (mmWave, millimeter wave)、非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 等^[1-2]。然而, 上述技术会带来难以负担的能源消耗、硬件复杂度和信号处理复杂度。为了实现高通量容量、大连接的未来无线网络, 研究创新、高效、节约资源和成本的解决方案势在必行。

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2022-01-09

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFA0711400); 国家自然科学基金资助项目 (No.U21A20452, No.U19B2044)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFA0711400), The National Natural Science Foundation of China (No.U21A20452, No.U19B2044)

近年来, 一项名为智能反射表面 (IRS, intelligent reflecting surface) 的新兴技术由于具有低功耗、低复杂度、可调控等特性, 被认为是可广泛应用于未来无线系统以提升通信性能, 并实现对无线环境进行智能控制的关键技术^[3]。具体来说, IRS 是一块由大量的反射单元组成的人造二维表面; 每个反射单元在不同的偏置电压激励下会表现出不同的物理特性, 其本质上是不同外界激励对电路元件如电感、电容的改变。拥有不同物理特性的反射单元对入射的电磁波信号会产生不同的相位、幅度影响。因此, 合理地调控每个反射单元的物理特性, 可以使被 IRS 反射的电磁波信号形成反射波束成形, 从而聚集反射信号的能量, 使其指向接收端, 起到提高接收信号强度的作用^[4]。同时, 由于 IRS 采用的是反射单元, 仅反射无线环境中已有的射频信号而不产生新的射频信号, 因此 IRS 能耗很低且不会产生新的干扰。将 IRS 部署在收发端之间, 在数学上就能实现对收发端无线信道的调控, 可以实现智能可控的无线环境。IRS 作为新的一维优化变量为无线系统带来了另外的优化维度且不会和现有无线系统产生冲突^[5]。因此, IRS 可结合各种无线技术来提升通信系统性能。

由于 IRS 的上述优点, IRS 辅助的无线通信系统得到了学术界的广泛关注, 研究方向包括硬件研发、性能优化、信道估计 (CE, channel estimation) 等^[6-8]。具体来说, 硬件研发通过反射天线阵列、超颖材料等开发出了用于不同频段无线系统的实际 IRS 平台^[9-11]; 性能优化的相关研究则针对不同无线系统的不同性能指标, 设计了相关的算法来获取最优的 IRS 相位配置^[12-22]; 信道估计旨在解决 IRS 辅助无线系统中的信道状态信息 (CSI, channel state information) 获取问题^[23-24]。在诸多的研究方向中, 物理层安全 (PLS, physical layer security) 这项日益重要的性能指标得到了广泛的关注和研究^[7]。由于无线网络环境越来越复杂, 传统的 PLS 增强技术难以保证系统的安全性。例如, 当窃听者 (Eav, eavesdropper) 与合法用户 (LU, legitimate user) 的地理位置相近时, 两者的信道相关性较强, 此时在基站 (BS, base station) 端进行多天线的波束成形 (BF, beamforming) 将信号指向 LU 显然也会使 Eav 接收到更多的信号, 无线系统的 PLS 难以得到保证^[25-26]。此时, 将 IRS 引入无线系统中, 通过对 IRS 进行联合配置, 可减弱反射到 Eav 的信号并增强反射到 LU

的信号, 从而辅助增强系统 PLS。因此, 大量研究将 IRS 引入无线系统中来构建更加安全的无线通信环境。由于相关研究的范围很广且各有特点, 本文将 IRS 辅助的无线通信系统的物理层安全研究大致总结为如下几个主要方向。一是信息理论安全, 该研究方向重点聚焦于 IRS 辅助的无线通信系统的安全速率 (SR, secrecy rate)、安全中断概率 (SOP, secrecy outage probability) 等 PLS 性能指标的理论分析或优化提升^[25-72]。二是隐蔽通信, 该研究方向旨在借助 IRS 的可重构能力将合法链路的通信隐藏起来, 避免被 Eav 侦测到^[73-79]。其他研究方向包括 IRS 辅助的无线通信系统中的密钥生成^[80-83]、导频污染攻击^[84-85]等。

本文通过总结上述主要研究方向的文献, 展示了目前 IRS 辅助无线通信系统的 PLS 研究热点方向, 并探讨了未来可能的研究热点方向。

1 IRS 简介

1.1 基本原理简介

IRS 的可重构特性可通过新兴材料超颖表面来实现^[9]。超颖表面是一种复合材料组成的表面, 在上面安装大量的超颖原子, 即通常所称的反射元件^[10]。对反射元件施加不同大小的偏置电压, 能够改变其几何形式和其余物理特性, 如谐振频率等。进一步地, 入射到超颖表面的电磁波信号的振幅、相位等也会相应地得到改变并反射出去。因此, 对施加在反射单元上的外界激励进行合理的调控, 即可使反射出去的信号形成波束的效果, 或是与其他路信号相干叠加, 从而增强无线系统性能。

1.2 总体研究情况

IRS 辅助的无线通信系统典型场景如图 1 所示。从 BS 发送的信号除了直接到达用户 UE, 还会经过 IRS 反射到达 UE。合理地调控 IRS 的 N 个反射元件的相位, 能够使叠加后的信号强度增大^[12]。当 BS 端配备多天线的时, 除了调控 IRS 的元件相位, 还需要联合优化 BS 的 BF 矢量。针对不同的系统性能指标, 如信噪比 (SNR, signal-noise ratio)、发送功率、多用户和速率 (sum rate)、能量效率 (EE, energy efficiency)、PLS 等, 需要不同的联合优化算法来获取最优的 BS 端 BF 矢量和 IRS 端相位配置。除此之外, IRS 还可以运用到不同的无线通信系统中与不同的无线技术结合, 如 mmWave 系统、NOMA 技术、正交频分复用 (OFDM, orthogonal

frequency division multiplexing) 技术等。比如, 文献[12]研究了 IRS 辅助的单用户多输入单输出 (MISO, multiple-input single-output) 无线系统中的接收信号强度最大化问题, 采用了交替优化的算法, 当 IRS 相位配置固定时, 最优的 BS 端 BF 矢量为最大速率传输比 (MRT, maximum-ratio transmission); 当 BF 矢量固定时, 通过一系列数学矩阵变换子问题后使用半正定松弛 (SDR, semidefinite relaxation) 来得到最优的 IRS 相位配置。文献[13]研究了 IRS 辅助的多用户 MISO 无线系统的 EE 优化问题; 基于序贯分式规划和梯度下降搜索算法, 提出了在一定用户服务质量 (QoS, quality of service) 限制下的 EE 提升算法, 仿真显示 IRS 辅助的无线系统能比中继辅助的无线系统提升 300% 的 EE。文献[14]首次研究了 IRS 辅助的多用户 MISO 无线系统的和速率最大化问题; 关于 IRS 相位配置的优化, 针对 3 种不同的 IRS 元件的幅度和相位的设定, 提出了 3 种不同的算法并对比了复杂度和性能。文献[15]研究了透镜天线与 IRS 结合的宽带 mmWave 系统并设计了性能提升算法。文献[16]引入了多块 IRS 来解决 mmWave 无线系统中高频信号的高路损问题, 研究了多块 IRS 协同辅助多用户的 mmWave 多天线系统, 并设计了基于功耗选择和连续凸逼近 (SCA, successive convex approximation) 的天线选择 EE 最大化算法。文献[17-18]研究了 IRS 辅助的多基站无线系统中的用户接入问题, 并提出了提升和速率的算法。在更具挑战的 Cell-Free 无线系统中应用 IRS, 文献[19]研究了和速率最大化问题, 通过拉格朗日对偶法和多维复二次变换将原问题分解为多个子问题, 之后用交替方向乘子法进行凸优化求解子问题。文献[20]研究了在用户中心网络中结合 IRS 以增强系统性能的框架和优化算法。文献[21]研究了利用 IRS 来增强无线供电物联网 (IoT, Internet of things) 系统中的下行无线充电与上行信息传输, 其中 IRS 的能耗也由无线充电所获取。

上述优化算法的设计都基于 CSI 全部已知的假设。然而由于 IRS 只有反射单元, 不具备射频链路和信号处理链路, 无法用 IRS 来接收或发送导频信号, 也就无法在 IRS 端进行 CE, 传统的 CE 算法需要进一步改进以运用到 IRS 辅助的无线通信系统中。文献[22]为了减少大量 IRS 元件带来的复杂度, 将 IRS 元件进行了分组, 并通过

最小二乘 (LS, least square) 估计得到每个分组对应的 CSI; mmWave 无线系统中的 CE 问题可以利用 mmWave 信道特有的稀疏特性。在 IRS 辅助的 mmWave 无线系统中, 文献[23]利用 mmWave 信道的稀疏性设计了基于压缩感知的 CE 算法。同样考虑 mmWave 无线系统, 基于深度学习 (DL, deep learning), 文献[24]将需要估计的二维级联信道建模为二维的图像, 并借助图像中的超分辨率恢复算法, 提出了利用二维图像行列之间的相关性、基于部分元件 on-off 的 LS 估计和超分辨神经网络的 CE 算法。

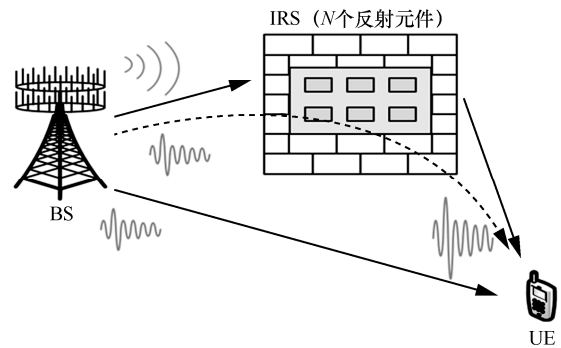


图 1 IRS 辅助的无线通信系统典型场景

2 IRS 辅助的无线通信系统的物理层安全

2.1 信息理论安全

在无线窃听环境中, 除了 LU, 还存在 Eav。由于无线通信的广播性质, BS 端发送的信息不仅不能被 LU 接收, 同样可以被 Eav 接收到。两者的数据速率差值即无线系统的 SR。如图 2 所示, 将 IRS 部署在无线环境中, 连接信号被障碍物阻挡, 信号可通过 IRS 反射到 LU 和 Eav。联合优化 BS 端 BF 矢量和 IRS 端相位配置, 可以提升 LU 处的数据速率并降低 Eav 处的数据速率, 从而起到提升系统 SR 和增强系统 PLS 的效果。

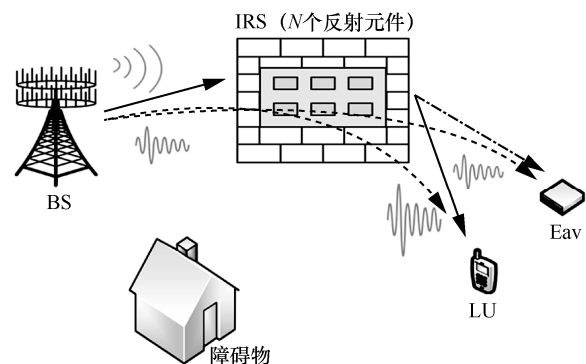


图 2 IRS 辅助的无线窃听系统

2.1.1 安全优化

优化算法设计是信息理论安全中流行的研究方向之一。对于不同的无线窃听环境，如多 Eav、多 LU、存在干扰者等场景，需要不同的算法来优化无线系统的 PLS 性能。针对 SR、发送功率等不同的优化性能指标和不同的限制条件，许多研究都提出了有效的算法，如基于交替优化和凸优化的传统算法、基于深度强化学习（DRL, deep reinforcement learning）的人工智能方法。

文献[25-26]研究了单天线的 Eav、一个 LU 的 IRS 辅助无线系统，并基于交替优化提出了最大化系统 SR 的算法。针对同样的无线系统，文献[27]研究了发送功率最小化问题，基于半正定规划（SDP, semi definite programming）求解并得到了最优 BF 矢量的闭式表达式。文献[28]将系统扩展到了具备多天线的 Eav 场景，并得到了最大化 SR 的 BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置的闭式和半闭式表达式。针对同样的模型和问题，文献[29]通过分式规划（FP, fractional programming）和流形优化（MO, manifold optimization）求解。进一步地，文献[30]考虑了多天线的 Eav 与 LU，并设计了最小-最大化（MM, minorization-maximization）算法来提升系统 SR。考虑更实际的 OFDM 系统，文献[31]利用 MM 算法和拉格朗日乘子法优化了 BS 端的多载波传输 BF 矢量和 IRS 相位配置，提升了系统 SR。在未来的 B5G/6G 中，mmWave 及太赫兹频段或将成为主要技术，因此，文献[32]在 mmWave 场景中部署了多块 IRS 用于补偿 mmWave 的高路损，研究了多块 IRS 的选择问题，设计了交替优化算法来优化多块 IRS 的选择向量、BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置。文献[33]则利用了高频段信道低秩的特性优化了 BS 端的混合预编码和 IRS 相位配置。文献[34]考虑了更复杂的无线环境，即存在多个 Eav 与多个 LU 的系统，首先提出了路径跟踪算法以最大化系统的最小 SR，为了减少算法复杂度，又基于迫零（ZF, zero force）BF 设计了一种具有闭式表达式的启发式算法。文献[35]研究了 IRS 能否用于人工噪声（AN, artificial noise）所增强的 MISO 无线窃听系统中，通过 SDR 方法联合优化了 AN 传输矢量、信息传输矢量和 IRS 相位配置，提升了系统 SR，证明了 IRS 与 AN 结合的有效性。对于 AN 辅助的多个 LU 与 Eav 的 MISO 无线窃听系统，文献[36]研究了每对 LU 与 Eav 的 SR 之和最大化问题，提出了基于 SCA

与乘法器交替方向器（ADMM, alternating direction method of multiplier）的算法。文献[37-38]结合 AN 在 IRS 辅助的 MIMO 系统中，基于最小均方误差（MMSE, minimum mean square error）和块坐标下降（BCD, block coordinate descent）对 BS 端的信息 BF 矢量、AN 传输矩阵和 IRS 端相位配置 3 个变量进行了联合优化，提升了系统的 SR。文献[39]进一步地扩展了安全无线传输中多块 IRS 的选择问题，在多 LU 的系统中，每个用户可以选择是否激活某一块 IRS。基于 SDR 与 SCA 设计了联合优化 BS 端 BF 矢量、IRS 相位配置、AN 传输矢量和多用户 IRS 选择矩阵的方案来最大化系统 SR。在无线窃听系统中，除 SR 外，发送功率也是值得优化的一个性能指标，文献[40]利用二阶锥规划算法在满足一定 QoS 的条件下最小化发送功率；文献[41]考虑了 MISO 无线窃听场景中的 EE 优化问题。首先通过 Dinkelbach 算法将分式目标函数转换为辅助变量相减的形式，之后利用交替优化和 SDR 进行求解；类似于 AN 干扰 Eav 的功能，文献[42]采用协同干扰（CJ, cooperative jamming）技术，通过一个干扰器来降低 Eav 处的数据速率，将发送功率和干扰传输功率都考虑在内，将系统的整体 EE 作为优化指标，采用 SDR 方法优化了 CJ 的 BF 矢量、BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置。除了上述半双工的接收机，也有文献考虑了全双工的接收机。文献[43]研究了在一个单输入多输出（SIMO, single-input multiple-output）系统中的全双工接收机，该接收机除了接收信号还发送信号干扰 Eav；设计了 BCD 算法框架来联合优化接收机的接收 BF 矢量、发送 BF 矢量和 IRS 相位配置。结合 NOMA 技术，文献[44]通过 SDP 与 SCA 优化了 BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置，且部分用户有安全速率限制，能以较低的复杂度遍历搜索找到最优的串行干扰消除（SIC, successive interference cancellation）解码顺序。在无线携能通信（SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer）系统中同样存在窃听问题，文献[45]研究了 IRS 辅助的 SWIPT 系统中的 PLS 相关问题，在满足一定 SR 限制下，设计了交替优化算法来最大化能量收集器处接收的能量。文献[46]将 IRS 辅助的 SWIPT 进一步扩展到物联网场景并联合 CJ 技术，研究了一定 SR 限制和功率传输限制下的能量收集最大化问题。通过一阶泰勒展开、松弛变量等数学方

法，将非凸问题转为凸问题并通过 SDR 进行优化；在双向通信中同样可以应用 IRS。文献[47]研究了存在一个 Eav 的双向通信场景和 SR 最大化问题，并基于交替优化算法优化了 2 个发送节点的发送功率和 IRS 相位配置。

上述研究工作都基于一个很强的假设：BS 端知晓 BS 到 Eav 的全部实时 CSI。实际上，只有当 Eav 曾接入 BS 中时才有可能获取其当时的 CSI。因此，许多研究更实际地假设只能获取 Eav 的部分 CSI，即不完美 CSI。除此之外，虽然许多研究提出了 IRS 辅助无线系统的信道估计算法，但获取的 CSI 依旧存在一定程度的误差。由于 IRS 辅助无线窃听系统对 LU 与 Eav 处的信道特性差异尤为敏感，针对误差 CSI 设计具有高稳健性的优化算法是极有意义与价值的。文献[48]考虑了 MISO 的无线窃听系统，并针对 3 种不同的 CSI 假设情况设计了对应的算法来最小化发送功率。文献[49]在 IRS 辅助的多窃听器 mmWave 无线系统中，利用离散样本加权和来处理 Eav 的 CSI 未知的问题，并利用 SDR 最大化了系统的最差 SR。文献[50]首次考虑了数据统计的 Eav-CSI 误差模型，并在满足一定中断概率的条件下，通过 SDR 与交替优化算法最小化了发送功率。由于算法基于 Eav 处级联信道的数据统计 CSI 误差并考虑中断概率限制，该算法相比基于完美 CSI 的工作有着更优越的稳健性。考虑更复杂的多 Eav、多 LU 且 Eav 均配备多天线的无线系统，文献[51]结合 AN 并在不完美 CSI 及一定 Eav 的 QoS 限制条件下，利用 SDR 和 SCA 最大化了多个 LU 的最差 SR 总和。将 IRS 与 Eav 之间的信道建模为边界 CSI 错误模型，并利用线性矩阵不等式处理 CSI 误差对算法设计带来的影响，提升了算法的稳健性。结合 NOMA 场景，文献[52]在 Eav-CSI 完全未知的情况下，利用史密斯正交化求解 AN 传输矩阵来干扰外部 Eav。对于内部的窃听问题则通过交替迭代的方法来求解 IRS 相位配置和 BS 端功率分配；为了设计高稳健性的算法，使算法在 CSI 不准确时也能取得效果，文献[54]在文献[42]的基础上进一步考虑了在边界 CSI 错误模型下，研究同样的 CJ 辅助的 EE 优化问题。基于 S-procedure 处理 CSI 不确定带来的影响，设计了在 CSI 不准确的情况下也能有效提升系统 EE 的高稳健性算法。同样利用 CJ 辅助的文献[53]则在边界 CSI 错误模型下研究了在窃听速率最大限制下如何最大化 SR 的问题，利

用柯西不等式等数学工具将原非凸问题转为凸问题，并利用 SCA 和惩罚凸凹过程算法来优化发送端 BF 矢量及 IRS 相位配置。文献[55]基于未知分布的 CSI 错误模型，设计了满足一定 PLS 条件下的广播多用户最小 SNR 的提升算法。由于该算法不依赖于 CSI 错误模型的具体数学分布而仅基于均值和反差，因此拥有更好的稳健性；进一步考虑 LU 处的 CSI 同样存在误差的情况，文献[56]假设所有 LU 与 Eav 处的 CSI 都满足边界错误模型，设计了在所有 CSI 均不完美的情况下也能提升和速率的高稳健性联合优化算法。

除了传统的凸优化方法，深度学习和强化学习也是有效的方法。文献[57]考虑单输入单输出(SISO, single-input single-output) OFDM 无线系统的 EE，并将其定义为 SR 除以总功率，其中总功率为发送功率加上所有 IRS 元件消耗的功率，通过设计好的深度神经网络(DNN, deep neural network)来预测最优的 IRS 相位配置和 IRS 元件数目。文献[58]首先通过传统算法得到最大化 SR 的最优 IRS 相位配置和 BS 端 BF 矢量，并将最优值作为对应 CSI 输入的标签来训练 DNN。训练完毕后的网络可接收其他的 CSI 输入并输出这种情况下对应的最优解；在无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)通信系统场景中，同样存在窃听问题且同样可由 IRS 辅助来增强 PLS。文献[59]设计了基于 DRL 的学习框架，将过时的 CSI 作为第一个深度确定性策略梯度(DDPG, deep deterministic policy gradient)网络的输入，动作空间为 UAV 端的 BF 矢量和 IRS 相位配置，将 UAV 的位置信息作为第二个 DDPG 网络的输入，将 UAV 的飞行距离和方向作为动作空间，两者的奖励函数均设置为与 SR 正相关。文献[60]利用 DRL 算法将不完美的 CSI、LU 和 Eav 的数据速率作为状态，将从码本中挑出的 BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置作为动作，并设计了与 LU 数据速率正相关而与 Eav 数据速率负相关的奖励。通过后验决策状态学习来对抗 CSI 的不确定性并通过优先经验回放提高了学习效率，最终提升了多用户的最差 SR 之和。再进一步地，文献[61-62]假设 Eav-CSI 是完全未知的，并在满足 LU 一定 QoS 的前提下通过最大化 AN 的发送功率，来尽可能地干扰 Eav，即恶化 Eav 处的信道情况并降低 Eav 处的信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)以提升系统的 PLS。IRS 辅助无线系统的物理层安全优化研究如表 1 所示。

表 1 IRS 辅助无线系统的物理层安全优化研究

文献	系统模型	优化目标	关键技术
文献[25-27,35,41,43,48,53,58,61,62]	单 LU、单 Eav、MISO	SR 最大化、发送功率最小化、EE 最大化、最差 SR 最大化	BCD、SDR、SDP、AN、Dinkelbach、DNN、SCA、柯西不等式、全双工 Jamming
文献[28-30,37-38]	单 LU、单 Eav、MIMO	SR 最大化	FP、MO、MM、MMSE、BCD、AN
文献[34,36,51,55-56,60]	多 LU、多 Eav、MISO	最小 SR 最大化、最小 SNR 最大化、和速率最大化	路径跟踪、ZF、DRL、SCA、ADMM、SDR、AN、惩罚凹凸规划
文献[40,42,50,54]	单 LU、多 Eav、MISO	发送功率最小化、EE 最大化	二阶锥规划、SDP、SDR、CJ、S-procedure、AN
文献[39]	多 LU、单 Eav、MISO	最小 SR 最大化	SDR、SCA、IRS 选择
文献[31,57]	单 LU、单 Eav、OFDM	EE 最大化、SR 最大化	DNN、MM、拉格朗日乘法
文献[44,52]	NOMA 无线系统	发送功率最小化、SR 最大化	SDR、SCA、史密斯正交化、AN
文献[32-33,49]	mmWave 无线系统	SR 最大化	MO、高频信道低秩特性、SDP、SDR、BCD、OMP
文献[45-46]	SWIPT 系统	能量采集最大化	SCA、SDR、一阶泰勒展开、序列参数凸逼近
文献[47]	双向通信系统	和 SR 最大化	凸函数差、GR
文献[59]	UAV 通信系统	多用户和 SR 最大化	DRL-DDPG
文献[86]	CRN 系统	EE 最大化	SDP、迭代惩罚函数、二阶锥规划、凸函数差
文献[87]	MEC 无线系统	发送功率最小化	SDR、Dinkelbach、全双工 BS

2.1.2 性能分析

性能分析的研究方向主要是从理论上推导出，即将 IRS 引入无线通信系统中，对系统的 PLS 性能带来多少数值提升，或者各种 PLS 性能指标的数学表达式，包括闭式表达式或渐近逼近表达式等。

文献[63]首先分析了最基本的 IRS 辅助窃听无线系统，考虑了单天线的 BS、Eav 和 LU 的系统模型。首先将 IRS 元件相位根据 LU-CSI 取为最优值，之后根据信道参数的瑞利分布特性和中心极限定理 (CLT, central limit theorem) 得到 LU 及 Eav 端的 SNR 概率分布特性，包括累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 和概率密度函数 (PDF, probability density function) 等。最后，根据 SOP 的表达式得到其渐近逼近的数学表达式；实际中 IRS 元件的相位通常是离散的、有限的，即并不一定总能取到最优值。因此，文献[64]将离散相位的影响考虑在内并研究了串通和不串通 2 种情形的 Eav。同样根据 CLT 等概率分析方法，对系统的遍历 SR (ESR, ergodic secrecy rate) 进行渐近分析并得到 2 种情形下的闭式逼近表达式；同样考虑离散相位，文献 [65] 采用 Fox’ H 转换理论及 Mellin-Barnes 积分，得到 SOP 及平均 SR (ASR, average secrecy rate) 的准确表达式和渐近表达式。对于多 Eav 的窃听系统，文献[66]计算了多个瑞利变量的样本极大值的 CDF，并据此推导了系统最差

SR 所对应的 SOP 与 ASR 的 CDF 与 PDF。在多用户随机分布的情况下，文献[67]借助随机几何的数学工具，考虑多 LU 服从齐次泊松分布过程并得到了 SOP、非零安全容量概率 (PNSC, probability of nonzero secrecy capacity) 和 ASR 的表达式。在 MIMO 系统中，得到了准确且精简的 SINR 的 CDF 表达式，并进一步地在高 SNR 条件下对中断概率进行了渐近分析，证明了当 IRS 元件数目较小时无法提升非视距链路小路损情况下的系统性能。在更复杂的 NOMA 系统中，文献[68]考虑了典型的 2 个用户的场景，并分析了接收端执行 SIC 后的 SINR 概率分布特性，之后分别得到了 2 个用户各自的信号所对应的 ASR 表达式。

IRS 可辅助的不仅仅局限于上述传统的无线窃听场景，还可运用到如车联网、物联网等各种通信场景中。在文献[69]中，IRS 用于辅助 2 辆车辆之间的通信，不依赖于使用 CLT，使用更多样的方法得到了存在一个直接窃听发送端信道的 Eav 时对应的 SOP 表达式，且通过仿真证明了在 IRS 元件数目较小时，表达式的结果和仿真的结果很相近。在设备到设备 (D2D, device-to-device) 通信中，文献[70]用 IRS 来辅助 2 个设备间的通信，而 BS 所在的中心网络则存在一个 LU、一个 Eav，分析了 D2D 通信的中断概率和中心网络的 SOP、PNSC 的数学表达式并用仿真证明了其正确性。文献[71]研究了全

表 2 IRS 辅助无线系统的物理层安全性能分析研究

文献	系统模型	性能指标	研究特点
文献[63]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 无线系统	SOP	连续 IRS 相位；大 IRS 元件数目；高 SNR；渐近分析
文献[64]	单 LU 及多 Eav 的 SISO 无线系统	ESR	离散 IRS 相位；大 IRS 元件数目；2 种 Eav 工作模式：协同、不协同；渐近分析
文献[65]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 无线系统	SOP	离散 IRS 相位；标度定理；渐近分析；闭式表达式
文献[66]	单 LU 及多 Eav 的 SISO 无线系统	SOP、ASR	射线模型；莱斯信道；闭式表达式
文献[67]	多 LU 及单 Eav 的 MIMO 无线系统	SOP、PNSC、ASR	连续 IRS 相位；随机几何；2 种场景：存在、不存在直连链路；2 种通信系统存在、不存在 IRS；渐近分析
文献[68]	2 个典型 LU 及单 Eav 的 SISO-NOMA 无线系统	ASR	连续 IRS 相位；闭式表达式
文献[69]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 车通信系统	SOP	连续 IRS 相位；不依赖于 CLT，即小 IRS 元件数目；闭式表达式
文献[70]	单中心用户及单 Eav 的 SISO-D2D 通信系统	SOP、PNSC	连续 IRS 相位；渐近分析
文献[71]	全双工 LU、单 Eav 的 SISO 无线系统	IP	连续 IRS 相位；2 种情形：存在、不存在干扰；闭式表达式
文献[72]	多对收发器、单 Eav 的 SISO 双向通信系统	ASR	连续 IRS 相位；标度定理；ASR 下界的闭式表达式

双工接收端的 SISO 无线系统，接收端在接收到发送端经 IRS 反射来的信息信号的同时也发送干扰信号用于降低窃听者的 SINR；并定义了该系统的截获概率（IP, intercept probability），根据 Eav 和 LU 端的 SINR 分布特性推导了 IP 在有、无干扰 2 种情况下的数学表达式。文献[72]考虑了多对发送节点的双向通信系统，首先设计了新的用户调度算法来提升 SR，之后又得到了 ASR 的一个下界的闭式表达式并分析了 ASR 的标度定律（当发送功率、IRS 元件数目、用户对数趋于无穷大时）。IRS 辅助无线系统的物理层安全性能分析研究如表 2 所示。

2.2 隐蔽通信

上述信息理论安全重在保护数据传输，使数据难以被 Eav 窃听。而隐蔽通信的目的则在于将合法链路的通信(Alice 到 Bob)隐藏起来，使 Eav(Willie)无法侦测到合法通信链路的存在。文献[73]首次提出了将 IRS 用于增强隐蔽通信的无线系统，如图 3 所示，通过调节 IRS 相位配置使收发端的通信链路隐蔽起来，使侦测者无法探测到收发端通信链路的存在。对 IRS 辅助隐蔽通信系统进行数学分析与优化后的性能结果指出，隐蔽通信的安全级别比信息理论安全更高，且隐蔽通信不依赖于 Eav 的能力。由于 IRS 对信道的可重配特性，可通过对 IRS 的优化使合法通信链路被侦测到的可能性进一步降低（或变成纯随机过程）。因此，将 IRS 引入隐蔽通信中，通过优化来降低合法链路被侦测的概率，同样是关于 IRS 辅助无线系统 PLS 增强的一个重要方向。

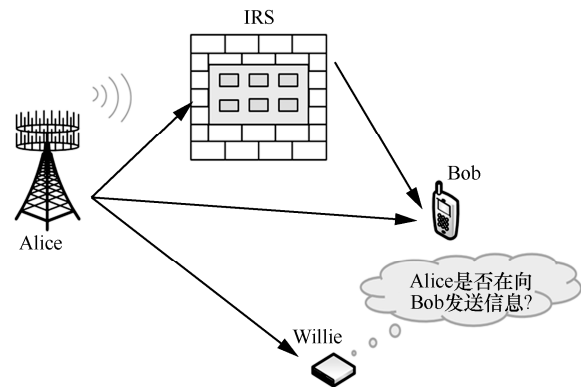


图 3 IRS 辅助的隐蔽通信系统

在文献[74]中，IRS 用于协助全双工多天线发送端（Alice）将信号绕过障碍物传给全双工接收端（Bob），同时一个 Eav（Willie）尝试检测到这段合法的通信链路，而 Bob 自身也会发送干扰信号用于扰乱 Willie 对通信链路是否存在的判断。文献[74]首先基于最佳检测阈值分析了 Willie 处的检测错误概率（DEP, detection error probability），得到了误判概率和漏判概率等重要指标的数学表达形式和概率特征；之后，研究了隐蔽速率（CR, covert rate）最大化的问题，通过惩罚对偶分解（PDD, penalty dual decomposition）和 BCD 算法对 BS 端 BF 矢量和 IRS 相位配置进行联合优化；类似于信息安全理论中 Eav 处的 CSI 通常难以全部知晓，Willie 也常常隐藏自己，使其 CSI 也通常难以获取。文献[75]针对 Willie 处不同的 CSI 情况进行了优化算法研究。首先考虑单天线的 Alice，在只有 Willie 的部分

CSI 情况下 (只知道信道矩阵的均值、方差), 针对最大化 CR 问题, 可直接得到最优的发送功率并利用三角不等式得到最优的 IRS 相位配置; 在 CSI 完全知晓的情况下, 通过 SCA、SDR 与高斯随机化 (GR, Gaussian randomization) 技术得到了上述最大化 CR 问题的解。之后考虑多天线的 Alice, 在部分 CSI 情况下, BS 端 BF 矢量设为 MRT 并通过凸优化工具 CVX 和 GR 得到 IRS 的最优相位配置; 在 CSI 完全知晓的情况下, 除了交替优化算法, 文献[75]还基于 ZF 和 Willie 链路功率最小化提出了 2 种复杂度较低的算法来最大化 CR。另外, 针对所有链路 (Alice、Bob、Willie 处) CSI 不完美 (边界 CSI 错误模型) 的各种情况, 文献[75]通过数学变化将各个问题变为凸问题, 并基于交替优化、SDR 和 GR 等技术求解使 CR 提升的最优值。文献[76]则从理论分析上证明了借助 IRS 可在非零传输功率的单天线 Alice 系统中实现完美隐蔽 (Willie 的检测等同于一个随机猜测的过程)。文献[76]首先研究了完美 CSI 情况下满足一定隐蔽限制条件时, Bob 处 SNR 最大化的问题; 将问题转化为广义非线性凸优化问题后, 利用惩罚连续凸优化 (PSCA, penalty successive convex approximation) 算法来联合优化 Alice 的传输功率、IRS 端的相位配置和幅度配置; 当 Willie 处的瞬时 CSI 未知而只知分布时, 得到了隐蔽限制的表达式并观察到其与 IRS 相位配置无关, 之后用 CVX 优化了 IRS 幅度配置和 Alice 传输功率

来提升 Bob 处的 SNR。文献[77]研究了 IRS-NOMA 无线窃听系统的上下行传输并假设 Alice 仅知晓 Willie 的数据统计 CSI, 系统中除了接收者 Bob, 还存在另一个接收者 Roy 且发送功率按一定比率分给 2 个用户。文献[77]首先得到了 Willie 处的 DEP 的分布特性和表达式并选择了能使错误概率最低的检测阈值; 之后研究了在 Roy 处 QoS 限制、Alice 传输功率限制和 Willie 处最低 DEP 限制下, Bob 处 CR 最大化的下行传输问题。Alice 处的功率分配经过数学分析后可得到最优解的闭式表达式, 而 IRS 相位配置的最优值则通过 SDR 得到。类似地, Alice 处 CR 最大化的上行传输问题也用同样的方法得到了研究和解决; 在隐蔽无线通信中, Alice 传输数据的概率同样也是影响整体性能的可优化变量之一。文献[78]研究了联合优化传输数据概率、发送功率和 IRS 相位配置来最大化 Bob 端可达数据速率期望的问题。其首先推导了 Willie 处 DEP 的精确闭式表达式, 之后通过搜索的方法来得到最优的传输数据概率和发送功率。除了典型指标 CR, 文献[79]还研究了传输中断概率优化问题。与前述工作类似, 其首先推导了 Willie 处的 DEP 表达式, 之后在隐蔽限制、最大传输功率限制下, 通过搜索和凸优化工具 CVX 降低了系统传输中断概率, IRS 辅助无线系统的隐蔽通信研究如表 3 所示。

2.3 其他

除了上述两大主流 PLS 研究方向, 无线系统的

表 3 IRS 辅助无线系统的隐蔽通信研究

文献	系统模型	研究内容	关键技术
文献[74]	无直连链路、单 Willie、一对全双工收发器的 MISO/MIMO 无线系统	DEP、通信中断概率的分析及闭式表达式; 一定隐蔽率及通信中断概率限制下的 CR 最大化问题	PDD、BCD、空间包围球技术
文献[75]	单 Willie、一对收发端的 SISO/MISO 无线系统	单/多天线 Alice 系统中, Willie 处部分/瞬时 CSI 情况下的 CR 最大化问题; 4 种非完美 Alice-Willie 级联链路 CSI 情况对隐蔽通信性能的影响	SCA、SDR、GR、MRT、ZF
文献[77]	单 Willie、2 个接收用户 Bob 与 Roy 的 SISO-NOMA 无线系统	上/下行 NOMA 系统 DEP 的分析; 上行 NOMA 系统 Bob 处 CR 最大化问题; 下行 NOMA 系统解码 Bob 信息 CR 最大化问题	SDR、SDP、GR
文献[76]	单 Willie、一对收发端的 SISO 无线系统	全 CSI 已知时, Bob 处 SNR 最大化问题; 无法知晓 Willie 处 CSI 时, 不同 IRS 反射幅度情况下的 SNR 最大化问题	PSCA、SCA
文献[78]	单 Willie、一对收发端的 SISO 无线系统	最差情况下期望 DEP 的闭式表达式; 联合优化传输概率、传输功率、IRS 相位的 Bob 速率最大化问题	二分搜索法、黄金分割法
文献[79]	单 Willie、一对收发端的 SISO 无线系统	Willie 的探测性能分析; 仅知晓 Willie 的数据统计 CSI 时, 一定隐蔽率下中断概率最小化问题	一维搜索法、CVX
文献[88]	单 Willie、一对收发端的 MIMO 无线系统	联合优化传输方差矩阵、IRS 相位的 CR 最大化问题	拉格朗日乘法、MM
文献[89]	单 Willie、一对收发端的 MISO 无线系统	完美隐蔽条件下的 CR 最大化问题	SDR、SVD

PLS 还有很多轻量级的研究方向如表 4 所示。而 IRS 的可重构特性，为整个无线系统的优化带来了新的维度，使其应用场景非常广泛，这也包括各种轻量级的 PLS 研究方向。比如，密钥生成 (SKG, secret key generation)。SKG 的目标是提高上下行信道的相关性，同时降低 BS-LU 信道和 BS-Eav 信道之间的相关性，这样 Eav 就难以获取有关密钥的信息。文献[80]首先推导了 IRS 辅助无线系统中的密钥容量 (SKC, secret key capacity) 的下界闭式表达式。之后通过 SDR 和 SCA 算法优化 IRS 的相位和幅度来最大化得到的闭式下界。文献[81]为了得到密钥速率 (SKR, secret key rate) 的数学表达式，首先将复数的信道系数拆分为独立的实部与虚部，进一步通过数学推导得到复信道系数的 PDF。之后考虑了高 SNR 及极大 IRS 元件数量 2 种特殊情况，并得到了 SKR 的上界闭式表达式。通过分析发现，可搜索 IRS 元件切换时间来提升 SKR；由于 SKR 与 Eav、LU 相应的信道的随机性有关，因此引入 IRS 对信道进行重配置可提升两者之间的随机性。文献[82]设计了一种启发式算法和 DRL 算法框架来提升无线系统的 SKR。考虑一次性密码本通信系统中的 SR，文献[83]设计了一种最优时隙分配算法来分配 SKG 和加密信息传输过程；之后，在 Eav-CSI 未知的情况下，基于泊松点过程推导了 SKR 的理论表达式。

另一个 PLS 的隐患为导频污染攻击 (PCA, pilot contamination attack)。在时分复用系统中，CSI 的获取通常基于信道互易性，且无线传输中导频序列通常为公开的，因此具备射频链路的有源 Eav 可发

送信号来干扰导频传输的过程。在 IRS 辅助的无线通信系统中，同样存在 PCA 的问题。在文献[84]中，Eav 发送的干扰信号和 Bob 发送的导频信号一同通过 IRS 反射到 Alice，因此 Alice 端 CE 得到的 CSI 有着较大误差。基于 MRT-BF 和安全正则化 ZF 预编码，文献[84]设计了交替优化算法来提升系统的 SR。另一个使用 IRS 的不同研究角度在文献[85]中得到了研究，假设 IRS 被 Eav 所使用，Bob 在传输导频时，除了直接发送到 Alice，还会经过 IRS 反射到 Alice。此时 Eav 通过对 IRS 进行配置能减弱 Alice 处的接收信号强度，降低 CE 的准确度。针对上述问题，文献[85]提出了一种基于最快检测的方法来检测 IRS-PCA 的存在，即在每一个时隙 Alice 接收到的信号序列都会和之前接收到的信号序列联合考虑来做决定。更进一步地，文献[85]设计了一种 IRS-PCA 存在情况下的新的 CE 算法。具体来说，多个协同节点一起发送互相正交的导频序列，且这些信号序列都会经过 IRS 反射后被 Alice 接收。因此可分析其中相似的分量来获取 IRS 相关 CSI。

3 结束语

3.1 研究总结

IRS 的可调控特性使其能实现对无线信道的重新配置。在整个无线传输系统中，等于引入了新的一维可优化变量。通过对收发端的 BF、功率分配、IRS 相位配置等进行联合优化，可以实现对整个无线系统性能的极大增强。因此，无线系统的 PLS 同样可以通过 IRS 的辅助而得到提升。

表 4 IRS 辅助无线系统的物理层安全其他研究方向

文献	研究目标	研究内容
文献[80]	存在多个非协同 Eav 的 SISO 无线系统中的 SKG 增强	SKC 下界的闭式表达式分析；基于 SCA-SDR 的最小 SKC 最大化优化算法
文献[81]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 无线系统中的 SKG 增强	准确 SKR 的分析；SKR 的渐近分析；通过调整 IRS 元件的切换时间来提升 SKR
文献[82]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 无线系统中的 SKG 增强	IRS 辅助 SKG 的流程设计；基于启发式算法和 DRL 的 SKG 增强
文献[83]	一次性密码本通信系统中的 SKG 增强	Eav 处 CSI 未知时，SKR 的理论表达分析；基于最优时隙分配算法的 SKG 增强
文献[90]	单 LU 及单 Eav 的 SISO 无线系统中的 SKG 协议设计	SKG 相关的信道探测协议设计；SKR 的上下界分析
文献[84]	存在 PCA 的 MIMO 无线系统中的 SR 增强	导频攻击下的 CSI 获取；基于 MRT/ZF 的 SR 最大化算法
文献[85]	IRS 辅助的 PCA 及其探测与反制	对 IRS 辅助的 PCA 的探测；基于多个协同节点传输的 CE 方法；基于 ZF 的 PLS 增强
文献[91]	IRS 辅助的导频攻击及 SR 降低	IRS 辅助导频攻击的流程设计；基于数据统计 CSI 的 SR 降低算法设计

在 IRS 辅助的无线窃听系统中, 对 IRS 进行有效配置可提升 LU 处的通信质量而降低 Eav 处的通信质量, 进而可从信息理论安全、隐蔽通信等不同的角度来提升 PLS 性能。

基于 IRS 的信息理论安全增强主要通过联合优化 IRS 与收发端 BF 来提升 SR、SOP 等 PLS 相关性能指标。最新的研究扩展到了更广泛的无线场景。文献[86]研究了认知无线网络 (CRN, cognitive radio network) 中的 PLS 问题, 设计了满足 CRN 中主用户干扰程度限制、次用户 SR 限制的系统 EE 最大化算法。文献[87]利用 IRS 增强了移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 系统的 PLS, 考虑本地计算的能耗、任务卸载等限制, 设计了联合优化 IRS 与 AN 的算法来降低系统的总功耗。

基于 IRS 的隐蔽通信系统, 旨在通过优化 IRS 使侦测者无法探测到合法通信链路, 从而提升系统的 CR。文献[88]考虑了多天线的 Bob 与 Alice, 提升了一定隐蔽限制条件下 MIMO-IRS 无线系统的 CR; 文献[89]研究了 IoT 网络中的 IRS 辅助隐蔽通信系统, 解决了完美隐蔽传输时的 CR 最大化问题。

PLS 研究方向的最新研究工作中, 如 SKG, 文献[90]推导了准静态环境中 SKR 上下界的闭式表达式并得出结论: SKR 与 IRS 元件数、相关系数、导频长度和反射信道质量相关。关于 PCA, 文献[91]将 IRS 用于破坏时分双工 (TDD, time division duplex) 系统中的信道互易性, 完成了导频攻击。

3.2 未来展望

目前, 基于 IRS 的信息理论安全增强的相关研究较为完善, 未来可考虑如下 2 个研究方向。

1) 多基站通信系统中的 PLS 增强。Cell-Free、用户中心网络等多基站无线系统中, 无线接入点和用户的数目更多、分布更广泛。在这样复杂的无线系统中, Eav、Jammer 的存在使系统的 PLS 问题更具有挑战性, 需要进一步考虑 IRS 部署的位置、复杂系统的 CSI 获取、用户的调度等。

2) 非法 IRS 的反制与对抗。由于 IRS 的低能耗、低成本特性, 不只有合法链路能利用 IRS 提升性能, 非法链路同样可以部署自己的 IRS 来辅助窃听链路或降低合法链路的性能。比如, 文献[85]将 IRS 用于辅助 Eav 的导频攻击; 文献[92]中 Eav 在 BS 附近部署自己的 IRS 来增强对合法信号的

反射收集。由于 IRS 无源, IRS 辅助的非法链路的侦测和相关 CSI 的获取都非常困难。此时, 传统的联合优化算法很难得到好的效果, 难以保证安全的无线传输。需要设计全新的技术手段来对抗非法 IRS。

基于 IRS 的隐蔽通信研究可以从如下 2 个方向进行扩展。

1) 更全面的系统设计目标。现有研究集中在设计最大化 CR 的算法。未来研究可以在满足各类隐蔽通信条件的限制下 (如 CR 大于或等于一定阈值、DEP 小于或等于一定限制等), 优化速率、能效、发送功耗等目标。

2) 更复杂的无线通信系统。现有研究多考虑单个接收端、发送端、侦测者的无线系统, 而实际无线系统更复杂。例如收发端、侦测者均配备多天线的^[88]、OFDM 无线系统、多个通信接收端等等。更复杂的无线系统具有更广泛的研究场景, 能为实际部署 IRS 增强隐蔽通信带来更大的参考价值。

IRS 辅助无线系统中 PLS 的其余研究方向目前集中在 SKG 与 PCA, 两者可从如下的角度进行研究扩展。

1) 多用户的分组 SKG 设计。在多用户的无线系统中, 每个用户的无线通信范围有限, 而部署 IRS 则能扩展信号覆盖范围。为此, 需要设计 IRS 优化算法来提升分组密钥容量。同时, 针对 IRS 辅助的 SKG 传输需要重新设计协同密钥提取协议。

2) 基于 IRS 的 PCA 检测与反制。目前研究大多利用 IRS 来进行 PCA, 而在存在 PCA 的无线系统中, 也可以通过引入 IRS 来进行检测与反制。例如, 通过提取 IRS 反射的导频信号信息来判断无线环境中是否存在其他的干扰源; 通过优化 IRS 来增强 LU 的导频传输链路通信质量。

参考文献:

- [1] GUO F Q, LU H C, GU Z J. Joint power and user grouping optimization in cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(2): 991-1006.
- [2] GU Z J, LU H C, ZHANG M, et al. Association and caching in relay-assisted mmWave networks: a stochastic geometry perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 8316-8332.
- [3] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transac-

- tions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [4] DI R M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [5] GONG S M, LU X, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: a contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2283-2314.
- [6] RENZO M D, DEBBAH M, PHAN-HUY D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019: 129.
- [7] ALMOHAMAD A, TAHIR A M, AL-KABABJI A, et al. Smart and secure wireless communications via reflecting intelligent surfaces: a short survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1442-1456.
- [8] 朱政宇, 王梓暉, 徐金雷, 等. 智能反射面辅助的未来无线通信网络: 现状与展望[J]. *航空学报*, 2021: doi.org/10.7527/S1000-6893.2021.25014.
- ZHANG Z Y, WANG Z X, XU J L, et al. Future wireless communication networks aided by intelligent reflectors: current status and prospects[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021: doi.org/10.7527/S1000-6893.2021.25014.
- [9] LIASKOS C, NIE S, TSIOLARIDOU A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(9): 162-169.
- [10] LIASKOS C, NIE S, TSIOLARIDOU A, et al. Realizing wireless communication through software-defined HyperSurface environments[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 19th International Symposium on*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 14-15.
- [11] TAN X, SUN Z, KOUTSONIKOLAS D, et al. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 270-278.
- [12] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[C]//*Proceedings of IEEE Transactions on Wireless Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [13] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [14] GUO H Y, LIANG Y C, CHEN J, et al. Weighted sum-rate maximization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [15] WANG Y Z, LU H C, ZHAO D, et al. Intelligent reflecting surface-assisted mmWave communication with lens antenna array[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021: doi.org/10.1109/TCCN.2021.3114184.
- [16] WANG Y Z, LU H C, ZHAO D, et al. Energy efficiency optimization in IRS-enhanced mmWave systems with lens antenna array[C]//*Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [17] ZHAO D, LU H C, WANG Y Z, et al. Joint passive beamforming and user association optimization for IRS-assisted mmWave systems[C]//*Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [18] ZHAO D, LU H C, WANG Y Z, et al. Joint power allocation and user association optimization for IRS-assisted mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(1): 577-590.
- [19] ZHANG Z J, DAI L L. A joint precoding framework for wideband reconfigurable intelligent surface-aided cell-free network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 4085-4101.
- [20] ZHAO D, LU H C, GUI Y Q, et al. Reconfigurable intelligent surface integrated user-centric network: architecture and optimization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(8): 93-99.
- [21] ZHU Z Y, LI Z, CHU Z, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface assisted wireless powered IoT systems with power splitting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021: doi.org/10.1109/TWC.2021.3117346.
- [22] YANG Y F, ZHENG B X, ZHANG S W, et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: protocol design and rate maximization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(7): 4522-4535.
- [23] WANG P L, FANG J, DUAN H P, et al. Compressed channel estimation for intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 905-909.
- [24] WANG Y Z, LU H C, SUN H. Channel estimation in IRS-enhanced mmWave system with super-resolution network[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(8): 2599-2603.
- [25] YU X H, XU D F, SCHÖBER R. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [26] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410-1414.
- [27] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Intelligent reflecting surface aided multi-antenna secure transmission[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(1): 108-112.
- [28] SHEN H, XU W, GONG S L, et al. Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted multi-antenna communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(9): 1488-1492.
- [29] FENG K M, LI X, HAN Y, et al. Physical layer security enhancement exploiting intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Communications*

- Letters, 2021, 25(3): 734-738.
- [30] DONG L M, WANG H M. Secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 787-790.
- [31] JIANG W H, CHEN B L, ZHAO J, et al. Joint active and passive beamforming design for the IRS-assisted MIMOME-OFDM secure communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 10369-10381.
- [32] XIU Y, ZHAO J, YUEN C, et al. Secure beamforming for multiple intelligent reflecting surfaces aided mmWave systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(2): 417-421.
- [33] QIAO J P, ALOUINI M S. Secure transmission for intelligent reflecting surface-assisted mmWave and terahertz systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1743-1747.
- [34] CHEN J, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Intelligent reflecting surface: a programmable wireless environment for physical layer security[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 82599-82612.
- [35] GUAN X R, WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: is artificial noise helpful or not? [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 778-782.
- [36] NIU H H, CHU Z, ZHOU F H, et al. Weighted sum secrecy rate maximization using intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6170-6184.
- [37] HONG S, PAN C H, REN H, et al. Artificial-noise-aided secure MIMO wireless communications via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(12): 7851-7866.
- [38] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Secrecy rate optimization for intelligent reflecting surface assisted MIMO system[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 1655-1669.
- [39] LI J, ZHANG L, XUE K P, et al. Secure transmission by leveraging multiple intelligent reflecting surfaces in MISO systems[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021: 1.
- [40] KAWAI Y, SUGIURA S. QoS-constrained optimization of intelligent reflecting surface aided secure energy-efficient transmission[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 5137-5142.
- [41] 刘期烈, 杨建红, 徐勇军, 等. 面向安全通信的智能反射面网络能效优化算法[J]. *电讯技术*, 2020, 60(12): 1391-1397.
- LIU Q L, YANG J H, XU Y J, et al. An energy-efficient optimization algorithm for secure-based intelligent reflecting surface networks[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(12): 1391-1397.
- [42] WANG Q, ZHOU F H, HU R Q, et al. Energy-efficient beamforming and cooperative jamming in IRS-assisted MISO networks[C]//*Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [43] TANG X, LAN X Q, ZHAI D S, et al. Securing wireless transmissions with RIS-receiver coordination: passive beamforming and active jamming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 6260-6265.
- [44] LI N, LI M, LIU Y W, et al. Intelligent reflecting surface assisted NOMA with heterogeneous internal secrecy requirements[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(5): 1103-1107.
- [45] SHI W P, ZHOU X B, JIA L Q, et al. Enhanced secure wireless information and power transfer via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(4): 1084-1088.
- [46] 朱政宇, 徐金雷, 孙钢灿, 等. 基于 IRS 辅助的 SWIPT 物联网系统安全波束成形设计[J]. *通信学报*, 2021, 42(4): 185-193.
- ZHU Z Y, XU J L, SUN G C, et al. Secure beamforming design for IRS-assisted SWIPT Internet of things system[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(4): 185-193.
- [47] WIJEWARDENA M, SAMARASINGHE T, HEMACHANDRA K T, et al. Physical layer security for intelligent reflecting surface assisted two-way communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(7): 2156-2160.
- [48] FENG B Q, WU Y P, ZHENG M F. Secure transmission strategy for intelligent reflecting surface enhanced wireless system[C]//*Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [49] LU X B, YANG W W, GUAN X R, et al. Robust and secure beamforming for intelligent reflecting surface aided mmWave MISO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(12): 2068-2072.
- [50] HONG S, PAN C H, REN H, et al. Robust transmission design for intelligent reflecting surface-aided secure communication systems with imperfect cascaded CSI[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2487-2501.
- [51] YU X H, XU D F, SUN Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2637-2652.
- [52] ZHANG Z, ZHANG C S, JIANG C J, et al. Improving physical layer security for reconfigurable intelligent surface aided NOMA 6G networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 4451-4463.
- [53] SUN Y F, AN K, LUO J S, et al. Intelligent reflecting surface enhanced secure transmission against both jamming and eavesdropping attacks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 11017-11022.
- [54] WANG Q, ZHOU F H, HU R Q, et al. Energy efficient robust beamforming and cooperative jamming design for IRS-assisted MISO networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2592-2607.
- [55] WANG S L, LI Q. Distributionally robust secure multicast beamforming with intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 5429-5441.
- [56] HU S K, WEI Z Q, CAI Y X, et al. Robust and secure sum-rate maximization for multiuser MISO downlink systems with self-sustainable

- IRS[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(10): 7032-7049.
- [57] ZOU X Y, CHEN M, HUANG C W, et al. Secure transmission for intelligent reflecting surface assisted communication with deep learning[C]//*Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.*
- [58] SONG Y Z, KHANDAKER M R A, TARIQ F, et al. Truly intelligent reflecting surface-aided secure communication using deep learning[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.*
- [59] GUO X F, CHEN Y B, WANG Y. Learning-based robust and secure transmission for reconfigurable intelligent surface aided millimeter wave UAV communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(8): 1795-1799.
- [60] YANG H L, XIONG Z H, ZHAO J, et al. Deep reinforcement learning-based intelligent reflecting surface for secure wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 375-388.
- [61] XIU Y, ZHANG Z P. Secure wireless transmission for intelligent reflecting surface-aided millimeter-wave systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 192924-192935.
- [62] WANG H M, BAI J L, DONG L M. Intelligent reflecting surfaces assisted secure transmission without eavesdropper's CSI[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 1300-1304.
- [63] YANG L, YANG J X, XIE W W, et al. Secrecy performance analysis of RIS-aided wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 12296-12300.
- [64] XU P, CHEN G J, PAN G F, et al. Ergodic secrecy rate of RIS-assisted communication systems in the presence of discrete phase shifts and multiple eavesdroppers[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(3): 629-633.
- [65] TRIGUI I, AJIB W, ZHU W P. Secrecy outage probability and average rate of RIS-aided communications using quantized phases[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(6): 1820-1824.
- [66] TUAN V P, HONG I P. Secrecy performance analysis and optimization of intelligent reflecting surface-aided indoor wireless communications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 109440-109452.
- [67] ZHANG J Y, DU H Y, SUN Q, et al. Physical layer security enhancement with reconfigurable intelligent surface-aided networks[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 3480-3495.
- [68] TUAN V P, HONG I P. Enhancing secrecy performance for NOMA systems with intelligent reflecting surface: analysis and optimization[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 99060-99072.
- [69] AI Y, DEFIGUEIREDO F A P, KONG L, et al. Secure vehicular communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 7272-7276.
- [70] KHOSHAFI M H, NGATCHED T M N, AHMED M H. Reconfigurable intelligent surfaces-aided physical layer security enhancement in D2D underlay communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1443-1447.
- [71] ZAGHDOUD O, MNAOUER A B, BOUJEMAA H. Intercept probability and secrecy capacity analysis of RIS-based wireless communication with full-duplex receiver[C]//*Proceedings of 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 843-848.*
- [72] LYU L, WU Q Q, LI Z, et al. Secure two-way communications via intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(3): 744-748.
- [73] LU X, HOSSAIN E, SHAFIQUE T, et al. Intelligent reflecting surface enabled covert communications in wireless networks[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(5): 148-155.
- [74] WANG C, LI Z, SHI J, et al. Intelligent reflecting surface-assisted multi-antenna covert communications: joint active and passive beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(6): 3984-4000.
- [75] SI J B, LI Z, ZHAO Y, et al. Covert transmission assisted by intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(8): 5394-5408.
- [76] ZHOU X B, YAN S H, WU Q Q, et al. Intelligent reflecting surface (IRS)-aided covert wireless communication with delay constraint[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 21(1):532-547.
- [77] LYU L, WU Q Q, LI Z, et al. Covert communication in intelligent reflecting surface-assisted NOMA systems: design, analysis, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021: doi.org/10.1109/TWC.2021.3106346.
- [78] KONG J, DAGEFUS F T, CHOI J, et al. Intelligent reflecting surface assisted covert communication with transmission probability optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(8): 1825-1829.
- [79] WU C Y, YAN S H, ZHOU X B, et al. Intelligent reflecting surface (IRS)-aided covert communication with warden's statistical CSI[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(7): 1449-1453.
- [80] JI Z J, YEOH P L, ZHANG D Y, et al. Secret key generation for intelligent reflecting surface assisted wireless communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 1030-1034.
- [81] HU X Y, JIN L, HUANG K Z, et al. Intelligent reflecting surface-assisted secret key generation with discrete phase shifts in static environment[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(9): 1867-1870.
- [82] LIU Y, WANG M, XU J, et al. Boosting secret key generation for IRS-assisted symbiotic radio communications[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.*
- [83] JI Z J, YEOH P L, CHEN G J, et al. Random shifting intelligent re-

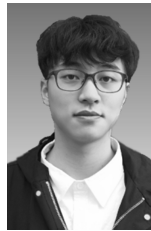
flecting surface for OTP encrypted data transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(6): 1192-1196.

- [84] BEREYHI A, ASAAD S, MÜLLER R R, et al. Secure transmission in IRS-assisted MIMO systems with active eavesdroppers[C]// Proceedings of 2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Piscataway: IEEE Press, 2020: 718-725.
- [85] HUANG K W, WANG H M. Intelligent reflecting surface aided pilot contamination attack and its countermeasure[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 345-359.
- [86] WU X W, MA J X, XING Z, et al. Secure and energy efficient transmission for IRS-assisted cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021: doi.org/10.1109/TCCN.2021.3114176.
- [87] LI B G, WU W J, LI Y H, et al. Intelligent reflecting surface and artificial noise assisted secure transmission of MEC system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021: doi.org/10.1109/IJOT.2021.3127534.
- [88] CHEN X, ZHENG T X, DONG L M, et al. Enhancing MIMO covert communications via intelligent reflecting surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 33-37.
- [89] MA S, ZHANG Y Q, LI H, et al. Covert beamforming design for intelligent reflecting surface assisted IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021: doi.org/10.1109/IJOT.2021.3109746.
- [90] LU T Y, CHEN L Q, ZHANG J Q, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted secret key generation in quasi-static environments[J]. IEEE Communications Letters, 2021: doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3130635.
- [91] YANG J, JI X S, WANG F H, et al. A novel pilot spoofing scheme via intelligent reflecting surface based on statistical CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12847-12857.
- [92] ALEXANDROPOULOS G C, KATSANOS K, WEN M W, et al. Safeguarding MIMO communications with reconfigurable metasurfaces and artificial noise[C]//Proceedings of ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[作者简介]



卢汉成(1977-),男,湖北通城人,博士,中国科学技术大学副教授,合肥综合性国家科学中心研究员,主要研究方向为智能反射表面辅助无线通信、多媒体通信与网络、无线异构网络中的资源优化等。



王亚正(1997-),男,土家族,浙江海宁人,中国科学技术大学硕士生,主要研究方向为智能反射表面辅助无线系统中的性能优化、信道估计、物理层安全等。



赵丹(1997-),女,山东临沂人,中国科学技术大学硕士生,主要研究方向为智能反射表面辅助的多基站无线系统、UCN系统。



罗涛(1999-),男,安徽合肥人,中国科学技术大学硕士生,主要研究方向为智能反射表面相关无线通信系统。



吴俊(1971-),男,湖北天门人,博士,复旦大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线网络关键技术、人工智能与机器学习、嵌入式系统软硬件技术等。